第65卷 第3期 天 文 学 报 Vol. 65 No. 3
2024年5月 ACTA ASTRONOMICA SINICA May, 2024

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2024.03.011

矮行星Haumea系统定心算法的探究*

郝佳男[1,2] 彭青玉[1,2†] 郭碧峰[1,2] 曹江龙[1,2] 洪瑶瑶[1,2]

(1 暨南大学计算机科学系 广州 510632)
(2 暨南大学中法天体测量、动力学与空间科学联合研究实验室 广州 510632)

摘要 受地球大气影响, 使用地基光学望远镜观测角距离较小的双星系统或主卫星系统时往往会出现星象不可分辨的情况. 因此, 系统光心位置与系统质心位置可能存在一定的偏差. 准确地测量太阳系天体系统质心位置可以改进其轨道参数, 有助于揭示太阳系的形成与演化. 以矮行星Haumea及其亮卫星Hi'iaka的运动为例, 仿真系统光心围绕质心扰动的过程, 探究视宁度(用星象的半高全宽表示)变化对准确测量光心位置的影响. 仿真结果表明, 使用二维高斯定心算法测定的系统光心位置随视宁度变化, 而修正矩定心算法的定心结果不受视宁度的影响. 根据仿真结果, 研究能够有效减少视宁度变化对光心位置准确测量影响的定心算法十分必要; 同时, 新的定心算法还需考虑主星光度变化的影响. 使用云南天文台2.4 m望远镜, 1 m望远镜以及紫金山天文台姚安观测站0.8 m望远镜从2022年2月7日至2022年5月25日观测矮行星Haumea系统, 得到29晚共463幅CCD图像. 新定心算法确定的光心位置与使用二维高斯定心算法的结果相比具有更好的位置拟合效果. 此外, 还发现亮卫星Hi'iaka在Jet Propulsion Laboratory (JPL)历表与Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (IMCCE)历表中的位置存在较大偏差.

关键词 天体测量学, 技术: 图像处理, 方法: 数据分析, 柯伊伯带天体: 个别: 妊神星

中图分类号: P129; **文献标识码**: A

1 引言

位于太阳系海王星轨道之外的柯伊伯带结构巨大, 其研究对于揭示太阳系的形成和演化具有重要意义. 许多柯伊伯带天体拥有伴星或卫星(以下简称主卫星系统), 但当使用地基光学望远镜观测它们时, 其在CCD图像上往往表现为单一的混合星象, 比如经过国际天文学联合会(International Astronomical Union, IAU)认证的冥王星(Pluto)、鸟神星(Makemake)、妊神星(Haumea)等矮行星及其卫星构成的主卫星系统都存在此种现象. 即在分辨率不足时, 观测得到的是系统光心位置. 当主星和卫星的质量比与光度比相差较大时, 系统光心和系统质心将出现不重合的情况. 1970年, Morel[1]表明光心绕转质心作开普勒椭圆运动. 2011年, Ortiz等[2]在对大柯伊伯带天体Orcus (有一颗卫星Vanth)进行33 d的地面观测中发现了其系统光心位置存在周期扰动现象, 即晃动(wobble). 通过长期高精度天体测量得到的准确光心运动轨迹在双星系统中常被用于双星轨道求解、质量计算[3]以及实际质心位置推导[4], 该方法同样适用于主卫星系统.

准确地测量系统光心位置依赖于许多因素. 据

2023-08-28收到原稿, 2023-12-11收到修改稿

*国家重点研发计划项目(2022YFE0116800), 国家自然科学基金项目(11873026、11273014), 国家自然科学基金天文联合基金重点项目(U1431227), 中国载人航天工程巡天空间望远镜专项科学研究项目(CMS-CSST-2021-B08)资助

†tpengqy@jnu.edu.cn

van de Kamp[5]研究, 系统光心在理论上是主星和卫星光度的加权中心点, 光心到主星的角距离$r_{\rm L}$只取决于主卫星之间的星等差及角距离. 但从地面观测时, 光心的准确位置测量可能受到大气视宁度变化的影响. 本文通过计算机仿真方法模拟了主卫星系统运动过程, 详细探究系统光心位置测量受视宁度变化的影响及相应的校正方法. 本文选用矮行星Haumea及其亮卫星Hi'iaka构成的主卫星系统作为研究对象. 由于Haumea另一颗暗卫星Namaka的视星等约为21.8 mag[6], 超过了本次探究所使用望远镜CCD在适度曝光时间内的极限成像阈值[7–8], 本文忽略了其带来的位置测量影响. 矮行星Haumea系统是柯伊伯带碰撞家族中已知的最大成员[9]. 所以主星Haumea和卫星Hi'iaka应具有相似的物理性质, 它们表面覆盖着大面积的水冰[10]也从侧面支持了该观点. 根据目前最新的测光结果[11], 主星Haumea及其卫星Hi'iaka的平均星等差为2.76 mag (J、H波段). Haumea系统的反照率数值接近于1[12]且为碰撞家族, 表明了主星和卫星颜色相近(在可见光和近红外波段). 因此, 它们之间的星等差是相近的. 本文采用了平均星等差为2.76 mag (即主卫星通量比为12.71)进行试验. 卫星Hi'iaka绕主星的公转周期为(49.12 ± 0.03) d[13], 两者之间的角距离在0.44″–1.45″之间变化(取自Jet Propulsion Laboratory (JPL)历表[1]和Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (IMCCE)历表[2]). 主星与亮卫星Hi'iaka的质量比为223.80 ± 13.75[14]. 此外, 矮行星Haumea有明显双峰自转光变曲线[15], 主星自转引起的光度变化对系统光心的影响也应该考虑在内.

本文其余部分组织结构如下. 第2节将阐述主卫星系统运动的规律, 基于仿真实验的结果提出校正光心的新定心算法; 第3节将介绍Haumea系统的观测资料和归算过程, 得出光心校正后的位置测量结果; 第4节将分析和讨论校正效果及亮卫星Hi'iaka在JPL历表和IMCCE历表的位置差异; 最后一节进行总结与展望.

2 研究方法

2.1 主卫星系统概述

图1描绘了主卫星系统的运动过程. 假设系统的质心$C_{\rm M}$固定不动, 主星P (Primary)和卫星S (Satellite)同时绕质心做同一方向的开普勒椭圆运动, 光心$C_{\rm L}$ (五角星形)绕质心$C_{\rm M}$ (圆形)也做相同方向的椭圆运动. 图中, 光心和质心到主星的角距离分别表示为$r_{\rm L}$和$r_{\rm M}$, 光心到质心的角距离表示为Δ, 主卫星之间的角距离表示为a. 据文献[5], 光心位置由主星和卫星的光度共同决定, 始终在两者的连线上, 更靠近光度较大的主星(符合杠杆原理). 因此如(1)式, $r_{\rm L}$与a成正比, 其中$L_{\rm P}$和$L_{\rm S}$分别为主星和卫星的光度.

$$r_{\rm L} = \frac{1}{1+\frac{L_{\rm P}}{L_{\rm S}}}a\,, \tag{1}$$

$r_{\rm M}$遵循相同原理, 则Δ的表达式如下, 其中$M_{\rm P}$和$M_{\rm S}$分别为主星和卫星的质量.

$$\Delta = r_{\rm L} - r_{\rm M} = \left[\frac{1}{\left(1+\frac{L_{\rm P}}{L_{\rm S}}\right)} - \frac{1}{\left(1+\frac{M_{\rm P}}{M_{\rm S}}\right)}\right]a = ka\,. \tag{2}$$

据文献[8], $\frac{1}{1+\frac{L_{\rm P}}{L_{\rm S}}} - \frac{1}{1+\frac{M_{\rm P}}{M_{\rm S}}}$采用系数$k$表示. 当系数$k$为一个常量值时, 光心绕转轨迹(最小的椭圆)形状与卫星绕主星公转轨迹(最大的椭圆)形状相同, 两者的大小成比例. 从地面观测, 唯有系统光心$C_{\rm L}$是视觉上可见且实践中可测量的, 所以图1也解释了在对某些目标长时间观测时, 观测的光心位置会出现周期性波动现象.

2.2 光心与视宁度变化关系探究

本文沿用Ortiz等[2]的仿真方法, 使用photutils库[3]模拟Haumea系统的运动来探究其光心轨迹的变化规律. 仿真函数需要设置主星和卫星中心位置、大气视宁度及光通量峰值等参数, 以得到二维高斯点源形状的仿真星象. 其中, 大气视宁度使用星象的半高全宽(Full Width at Half-Maximum, FWHM)表示. 为了控制单一变量, 本实验暂不考

[1]https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi#top/
[2]http://vo.imcce.fr/webservices/miriade/
[3]https://photutils.readthedocs.io/en/stable/api/photutils.datasets.make_gaussian_sources_image.html/

虑添加泊松噪声[16]. 将主星置于图像中央, 从IMCCE历表中以1 h为间隔获取从2022年2月7日到3月30日共52 d约1个周期的亮卫星Hi'iaka相对于主星的位置偏差, 并以紫金山天文台姚安观测站0.8 m望远镜CCD比例尺0.348(″)·pixel^{-1}换算出卫星的像素坐标. 根据文献[16–17], 当星象的FWHM大于2个像素时, 星象不欠采样. 即在本次仿真中视宁度大于0.7″时, 星象不出现欠采样情况.

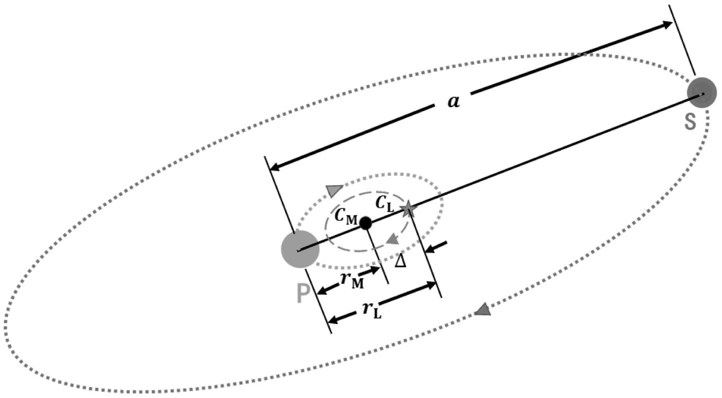


图 1 主卫星系统运动规律图. 主星P和卫星S同时绕质心$C_{\rm M}$做同一方向的开普勒椭圆运动, 光心$C_{\rm L}$绕质心$C_{\rm M}$也做相同方向的椭圆运动. $r_{\rm L}$和$r_{\rm M}$分别表示光心和质心到主星的角距离, Δ表示光心到质心的角距离, a表示主卫星之间的角距离.

Fig. 1 Diagram of primary and satellite system. Both the primary P and the satellite S move around the center of mass $C_{\rm M}$ clockwise. The photocenter $C_{\rm L}$ also moves around $C_{\rm M}$ clockwise. Symbols $r_{\rm L}$ and $r_{\rm M}$ show the angular distances from the photocenter and the center of mass to the primary, respectively. Symbol Δ shows the angular distance between the photocenter and the center of mass. Symbol a shows the separation between the primary and the satellite.

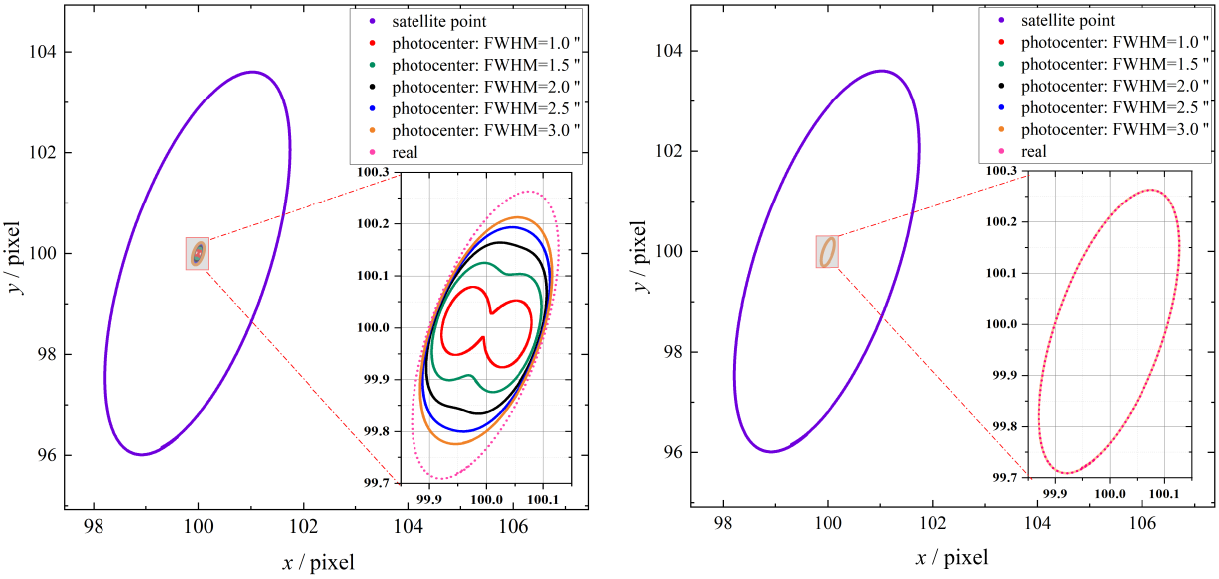
在1.0″、1.5″、2.0″、2.5″、3.0″的视宁度下, 根据主卫星平均星等差2.76 mag设置主卫星的光通量, 模拟亮卫星Hi'iaka绕主星运动的过程, 并采用二维高斯函数(Gaussian, GS)[16]对混合星象拟合得到光心位置, 结果如图2 (a)所示. 视宁度(用星象FWHM表示)数值越大, 光心轨迹形状越接近于椭圆, 但其大小仍小于真实的光心轨迹(粉色). 并且当视宁度小于2.0″时其明显向中心对称凹陷, 这与2.1节所述的光心轨迹规律[5]并不相符. 该现象可能与所用的定心算法有关. 当卫星距离主星最远时, 混合星象出现形状不规则的情况, 且视宁度数值越小越不规则. 因此使用二维高斯定心算法进行定心会受到一定的影响.

为了验证这种猜测, 本文也使用了修正矩算法(Modified Moment, MM)[16]确定光心. 修正矩算法通过求一阶矩确定目标的质心, 目标的光度质心就是光心, 两者的定义相符. 但其对于星象靠近拟合区域边界带来的位置误差最为敏感[16], 所以采取两次修正矩迭代的方式, 即将第一次的初步定心结果作为第二次的输入, 来保证星象位于拟合区域中央. 采用修正矩算法定心并重复上述过程, 光心轨迹仿真结果如图2 (b)所示.

显然, 修正矩定心下的光心轨迹在不同视宁度时相同并且和真实的光心轨迹(粉色)重合. 这表明修正矩定心结果并不受视宁度变化影响, 准确测量了光心位置. 修正矩算法表达式中质心位置与拟合区域内像素到质心距离的一次方成正比, 此线性关系使得星象的FWHM大小变化时(即视宁度变化), 其质心位置不变.

下面将对这两种定心方法确定的光心位置进行定量分析. 每种定心方法都仿真了5个不同视宁度数值下的卫星绕转周期(每周期有1248个光心位置点), 计算出光心到主星的角距离$r_{\rm L}$作为纵坐标, 主星和卫星之间的角距离a作为横坐标, 如图3所

示. 修正矩定心(MM)下$r_{\rm L}$与a之间的关系在不同视宁度下均为相同的直线, 且$r_{\rm L}$实测值(MM)因与2.1节(1)式计算得到的真实值(real)相同而重叠. 高斯定心(GS)下$r_{\rm L}$与a之间的关系在不同视宁度下整体呈现不同倾角的曲线, 此定心结果明显受到了大气视宁度变化的影响. 当卫星距离主星越远及视宁度数值越小时, $r_{\rm L}$实测值与真实值相差越大. 在本次仿真中高斯定心(GS)下的$r_{\rm L}$实测值与真实值相差最大为$\sim$0.284 pixel (0.099$''$), 其受到视宁度变化的影响最大为$\sim$0.214 pixel (0.074$''$). 综合定性和定量分析, 在无噪声干扰时修正矩方法比二维高斯方法更适合测量主卫星系统的光心位置.



(a) GS方法 (b) MM方法

图 2 左、右两幅子图分别展示了高斯方法和修正矩方法定心下的光心轨迹. 其中, 紫色轨迹为仿真时卫星绕转主星一周的轨迹, 粉色轨迹为真实的光心轨迹. 右下角为红色矩形内部的细节信息, 图(a)中从里到外依次是视宁度(FWHM)数值为1.0$''$、1.5$''$、2.0$''$、2.5$''$、3.0$''$时的光心轨迹, 图(b)中不同视宁度下的光心轨迹因相同而互相重叠.

Fig. 2 The left and right panels show the photocenter tracks with GS and MM centering algorithms, respectively. In each panel, the purple track shows the orbit of the satellite around the primary during the simulation, and the pink track shows the real photocenter track. The details of the interior of the red rectangle are shown in the lower right inset. The photocenter tracks in panel (a) are shown from the inner to exterior with the seeings (FWHMs) of 1.0$''$, 1.5$''$, 2.0$''$, 2.5$''$, 3.0$''$, and the photocenter tracks in panel (b) are the same at different seeings and overlaps.

2.3 本文定心算法概述

本文同样仿真了有噪声的情况. 假定主星与卫星只在图像x轴方向相隔4个像素(相当于IMCCE历表中主卫星的最远角距离1.45$''$). 在该情况下, 两种定心算法下的光心位置差异最大. 本文参考了实际观测图像的背景, 对每幅仿真图像添加了背景噪声以及星象噪声, 均为随机泊松噪声. 增加噪声后, 目标星象的信噪比为$\sim$35, 与姚安观测站0.8 m望远镜观测Haumea系统的信噪比相近. 视宁度在1$''$–3$''$间以0.01$''$为间隔顺序取值. 在每一视宁度下仿真无噪声的主卫星系统并用高斯和修正矩方法分别定心, 接着添加20次的随机泊松噪声并再次使用上述两种方法定心, 计算星象x轴坐标的均值和标准差. 将有无噪声时x轴坐标的偏差作为纵坐标, 视宁度作为横坐标, 探究噪声对高斯和修正矩方法定心结果准确性的影响, 结果如图4所示. 高斯定心受到

噪声的平均影响为~1 mas, 而修正矩定心受到噪声的平均影响高达~38 mas.

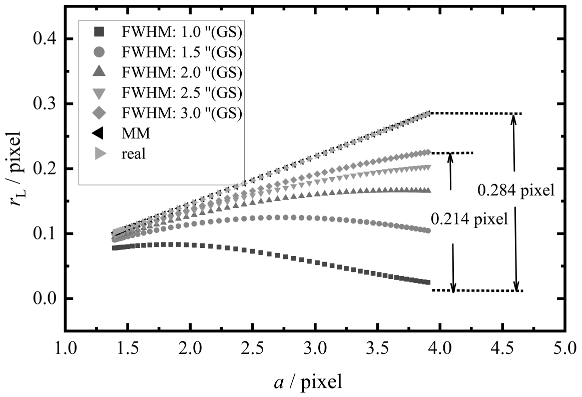


图 3　光心到主星的角距离r_{L}与主卫星角距离a之间的关系

Fig. 3　The relationship between the angular distance r_{L} from the photocenter to the primary and the angular distance a from the satellite to the primary

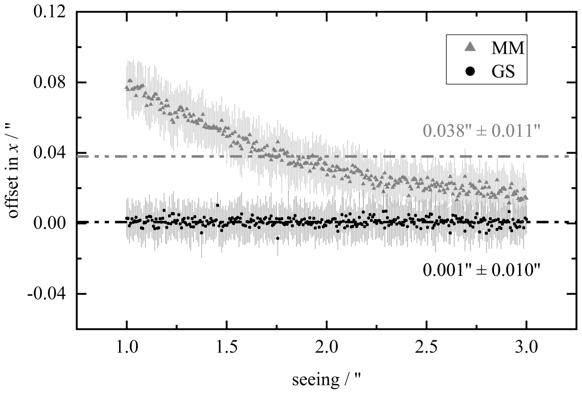


图 4　高斯和修正矩方法定心受到噪声的影响程度

Fig. 4　The influence of noise on the centering results of GS and MM centering algorithms

因此, 在实际拍摄的CCD图像中, 直接对单一的混合星象(不可分辨主卫星系统)改用修正矩定心并不能达到预期. 基于高斯定心受噪声影响小而修正矩定心在无噪声时更准确的特点, 本文提出新的定心算法(GS_new)作光心校正, 以减小视宁度变化对光心位置测量带来的影响. 假设有噪声时星象的高斯定心为$\mathrm{GS}^{(2)}$, 无噪声时星象的修正矩定心和高斯定心分别为$\mathrm{MM}^{(1)}$和$\mathrm{GS}^{(1)}$, 计算两者间的坐标差, 将此坐标差补偿到$\mathrm{GS}^{(2)}$上, 得到校正后的新坐标$\mathrm{GS}^{(\mathrm{new})}$, 如(3)式所示:

$$\begin{cases} \mathrm{GS}_x^{(\mathrm{new})} = \mathrm{GS}_x^{(2)} + (\mathrm{MM}_x^{(1)} - \mathrm{GS}_x^{(1)}) \,, \\ \mathrm{GS}_y^{(\mathrm{new})} = \mathrm{GS}_y^{(2)} + (\mathrm{MM}_y^{(1)} - \mathrm{GS}_y^{(1)}) \,. \end{cases} \tag{3}$$

3　实测资料光心校正结果

3.1　观测资料及处理过程

我们从2022年2月7日至5月25日用3台不同的地基光学望远镜观测Haumea系统, 历时29晚(其中4晚由2台在不同站点的望远镜同时进行观测)共拍摄463幅CCD图像. 所使用仪器的相关参数如表1. 观测过程中均采用Cousins-I滤光片, 以减少颜色较差折射的影响[18], 但拍摄的CCD图像会出现干涉条纹[19]. 在对观测图像进行了本底、平场、暗场校正后, 按照文献[8]的方法去除干涉条纹. 接着通过半高宽法测算每一幅处理后CCD图像的大气视宁度范围[20], 经统计其分布在1.0″–3.0″之间.

经过预处理, 本文对观测资料进行初步归算. 首先采用二维高斯定心方法确定各CCD图像所有星象中心的像素坐标, 并将恒星的像素坐标与Gaia Data Release 3 (Gaia DR3)[21]星表匹配. 其次计算匹配恒星在拍摄时刻的天体测量位置, 采用加权30常数模型[22–23]求解底片常数. 根据底片常数, Haumea系统光心的像素坐标(x, y)转换为标准坐标(ξ, η) (ξ和η分别为赤经和赤纬在切点处的投影平面坐标[24]), 再通过反投影公式[24]计算出光心的赤道坐标(α, δ) (以春分点为原点的赤道坐标系, α表示赤经, δ表示赤纬), 将其与IMCCE历表中的理论位置(即Haumea系统质心位置)比较. 最终得到此系统光心的位置残差$O-C$ (The Observed minus Computed), 即观测系统光心与理论系统质心的偏差. 在同一晚对目标的多次观测中, 本文计算了赤经和赤纬两个方向位置残差的均值和标准差. 对于每幅图像, Haumea的位置测量误差在20–50 mas之间, 此误差具体取决于观测条件.

3.2　主星瞬时光变对位置的最大影响

据文献[12], 亮卫星Hi'iaka的光度只占主星光度的~6%. 其光变的振幅为19% ± 1%[25]. 根据亮卫星Hi'iaka的光度占比和光变幅度, 可估计出其对系

统光变的影响小于1%. 因此可以认为系统光变主要是由主星光变引起的. 李丹等[26]对本批资料进行了光度测量, 得到了Haumea系统的光变曲线(由主星引起的光变). 因此, 根据光变曲线、观测资料的时间相位和主卫星的平均星等差2.76 mag[11], 可以计算出观测时刻主卫星的星等差. 仿真Haumea系统星象时, 按照计算的星等差数值来设定主卫星通量比并进行MM定心, 与按照平均星等差数值设定主卫星通量比并GS定心的结果相减, 得到了补偿值. 因此, 补偿值同时包含了视宁度变化和主星光度变化对光心位置的影响. 经实验测量, 主星Haumea光变对光心的位置测量影响最大不超过9 mas, 与李丹等[26]通过理论公式推导出的数值一致.

表 1 望远镜及CCD的详细说明
Table 1 Specifications of the telescope and its CCD

Parameters	2.4 m (Lijiang)	1 m (Kunming)	0.8 m (Yaoan)
Focal Length	1920 cm	1330 cm	800 cm
Diameter of primary mirror	240 cm	100 cm	80 cm
Size of CCD array	1900 × 1900	4096 × 4112	2048 × 2048
Size of pixel	13.5 μm × 13.5 μm	15 μm × 15 μm	13.5 μm × 13.5 μm
Scale factor	$0.283\ ('')\cdot\mathrm{pixel}^{-1}$	$0.233\ ('')\cdot\mathrm{pixel}^{-1}$	$0.348\ ('')\cdot\mathrm{pixel}^{-1}$
Field of view	$9.0' \times 9.0'$	$16.0' \times 16.0'$	$11.8' \times 11.8'$
Exposure time	100 s	500 s	300–600 s
Number of images	60	82	321
Night (s) observed	1	7	25

3.3 结果

将2.3节的新定心算法应用于实际观测的CCD图像中, 定心的准确性与仿真的真实性密切相关. 针对每一幅CCD图像, 尽可能模拟实际观测中的Haumea系统成像. 具体来说, 第一步从IMCCE历表中获取拍摄时刻卫星相对于主星在赤经和赤纬方向的位置偏差($''$), 再通过初步归算得到的底片常数模型计算出CCD的取向(即图像x轴与α方向的夹角)和比例尺, 以确定主星与卫星的中心位置; 第二步从IMCCE历表中获取拍摄时刻Haumea系统在赤经和赤纬方向的角速度($('')\cdot\mathrm{s}^{-1}$), 以确定Haumea系统在曝光时间内的移动距离; 第三步计算拍摄图像时的视宁度; 第四步结合Haumea系统光变曲线[26]得到主星光度变化下的主卫星光通量比; 第五步联合上述参数, 模拟CCD在曝光时间内对Haumea系统的采样过程; 最后采用2.3节的新定心算法确定光心, 得到新的像素坐标. 以3.1节步骤重新进行归算, 得到了在赤经和赤纬方向的位置残差结果, 分别如图5和图6所示. 图中, 空心矩形是每晚观测资料初步归算得到的平均$O-C$, 实心圆形是经过光心校正后的归算结果. 根据Peng等[8]的方法对这两组位置残差进行拟合得到的三参数结果如表2所示. 第2列k为(2)式中用于计算光心到质心角距离Δ的比例系数, 第3列A和第4列D分别为赤经和赤纬方向上观测时刻的真实质心相对于IMCCE历表理论质心的偏移量. 将IMCCE历表中对应时刻的主卫星间距a及表2中每一行的3个参数代入文献[8]中的(3)式, 可方便得到校正前后位置残差的拟合线: 虚线为二维高斯定心的拟合结果, 实线为新定心算法的拟合结果.

4 讨论

4.1 定心效果

本文使用新定心算法对原来的GS定心结果

进行了校正, 以减少视宁度和主星光度变化对系统光心准确位置测量的影响. 与原来的GS定心算法相比, 本文提出的定心算法能更准确地测量出Haumea系统的光心, 具体体现在两方面. 第一, 模型的拟合优度量化指标—归一化χ^2(表2第5列Reduced_χ^2)在本文提出的定心算法下为3.28, 要小于使用GS定心算法时的结果3.90. 本文的方法在一定程度上减小了归一化χ^2的数值, 拟合效果有一定的提升. 因为光心位置测量同时也受其他因素的影响, 例如: Haumea光环、较差颜色折射效应、大气湍流等, 所以归一化χ^2值没有达到理想情况下的数值1. 本文作者将在未来考虑更多因素以进一步提高模型与矮行星Haumea系统的契合度; 第二, 使用本文提出的定心算法后, 拟合输出的平均比例系数k从0.0475增加到0.0681, 与原设定参数(即通量比12.71, 质量比223.8)代入(2)式计算出的理论值0.0684更为接近. 该数值也表明了本文定心结果准确性的提升.

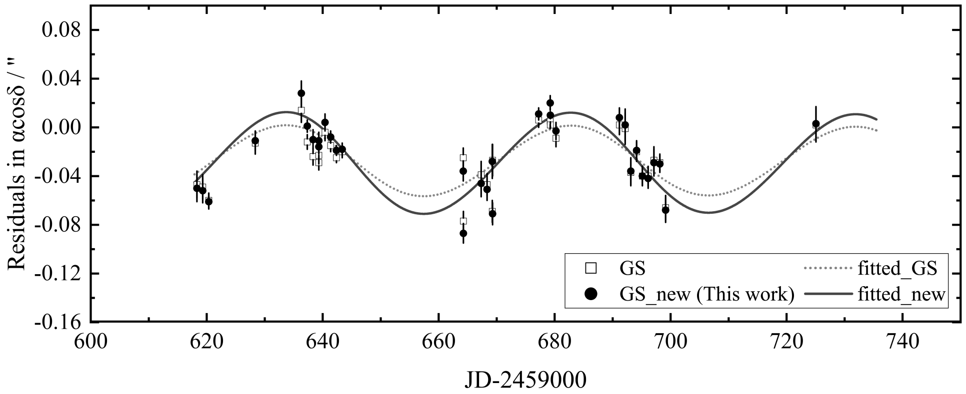


图 5 Haumea在赤经方向上的残差分布图. 空心矩形表示使用高斯定心算法时的平均位置残差并用点线拟合, 实心圆形表示使用新定心算法时的平均位置残差并用实线拟合.

Fig. 5 The positional residual distributions of Haumea in right ascension. The hollow rectangles show the average position residuals fitted with a dotted line when using the Gaussian centering algorithm, and the solid circles show the position residuals fitted with a solid line when using the new centering algorithm.

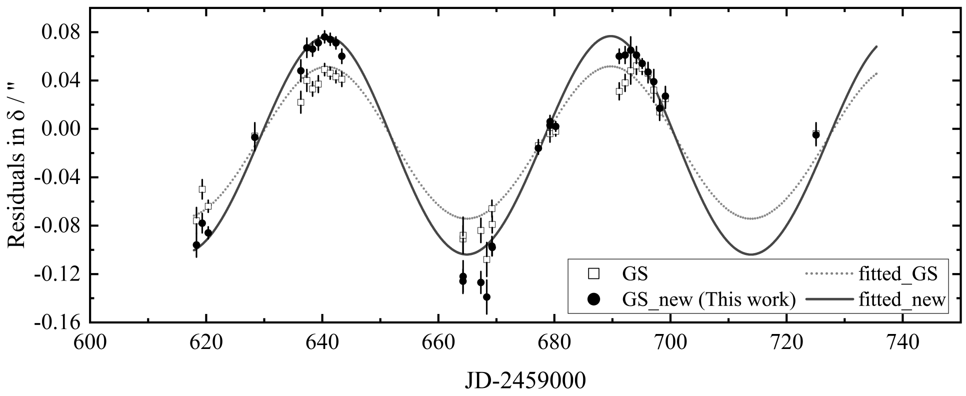


图 6 Haumea在赤纬方向上的残差分布图. 空心矩形表示使用高斯定心算法时的平均位置残差并用虚线拟合, 实心圆形表示使用新定心算法时的平均位置残差并用实线拟合.

Fig. 6 The positional residual distributions of Haumea in declination. The hollow rectangles show the average position residuals fitted with a dotted line when using the Gaussian centering algorithm, and the solid circles show the position residuals fitted with a solid line when using the new centering algorithm.

表 2 三参数模型的拟合结果

Table 2 The fitted result of the three parameters model

Method	k	$A/''$	$D/''$	Reduced_χ^2
GS	0.0475 ± 0.0012	-0.0271 ± 0.0009	-0.0083 ± 0.0008	3.90
GS_new	0.0681 ± 0.0011	-0.0288 ± 0.0009	-0.0093 ± 0.0008	3.28

4.2 卫星Hi'iaka在JPL历表与IMCCE历表的位置对比

在第3.3节拟合位置残差的过程中, 需要从历表获取卫星Hi'iaka相对于主星在赤经和赤纬方向的角距离参数, 本文发现同一时刻下赤经方向上的该参数在JPL#110和IMCCE历表中存在较大的差异, 如图7所示. 虚线和实线分别是基于JPL#110与IMCCE历表得到的拟合线, 两条线几乎呈现完全相反的波动. 显然, 经过光心校正后的观测数据(表示赤经方向的位置残差)波动周期规律与实线(数据源于IMCCE历表)理论周期规律基本一致. 因此, JPL#110历表中卫星Hi'iaka相对于主星在赤经方向的角距离可能不准确.

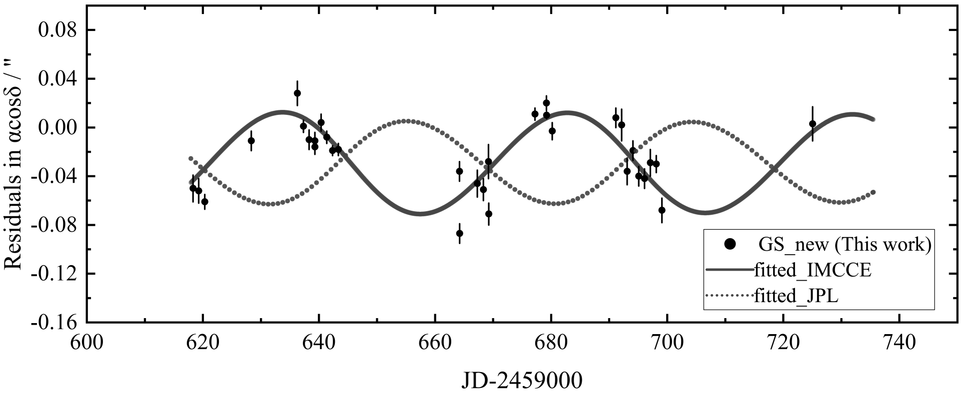


图 7 卫星Hi'iaka在JPL历表与IMCCE历表中的位置比较. 实心圆形表示使用新定心算法时在赤经方向的平均位置残差. 点线和实线分别是基于JPL与IMCCE历表得到的拟合线.

Fig. 7 The position comparison of the satellite Hi'iaka in the JPL ephemeris and IMCCE ephemeris. The solid circles show the average position residuals in right ascension when using the new centering algorithm. The dotted and solid lines are the fitted lines obtained based on JPL and IMCCE ephemeris, respectively.

5 总结与展望

本文使用仿真法模拟主卫星系统的运动, 以柯伊伯带中典型的不可分辨Haumea主卫星系统为例, 探究了其光心的准确位置测量方法. 根据无噪声下修正矩比二维高斯方法能够更准确地测量系统光心及二维高斯定心结果受噪声影响小的特点, 提出了一种新的定心方法并应用于29晚目标为矮行星Haumea系统(Haumea-Hi'iaka)的观测图像. 应用结果表明, 该方法减少了视宁度和主星光度变化对主卫星系统光心位置准确测量的影响, 有利于得到其准确的轨道参数. 该方法也可扩展应用于类似的主卫星系统或双星系统.

致谢 感谢中国科学院云南天文台1 m望远镜以及中国科学院紫金山天文台姚安观测站0.8 m望远镜运行团组全体成员提供的观测. 我们还感谢丽江2.4 m望远镜全体员工的支持, 该望远镜资金由中国科学院和云南省政府提供.

参考文献

[1] Morel P J. A&A, 1970, 6: 441
[2] Ortiz J L, Cikota A, Cikota S, et al. A&A, 2011, 525: A31
[3] Torres G. MNRAS, 2022, 514: 5183
[4] Kaasalainen M, Tanga P. A&A, 2004, 416: 367
[5] van de Kamp P. ARA&A, 1975, 13: 295
[6] Burkhart L D, Ragozzine D, Brown M E. AJ, 2016, 151: 162
[7] Guo B, Peng Q, Chen Y, et al. RAA, 2022, 22: 055007
[8] Peng Q Y, Guo B F, Vienne A, et al. A&A, 2023, 672: A61
[9] Brown M E, Barkume K M, Ragozzine D, et al. Nature, 2007, 446: 294
[10] Trujillo C A, Brown M E, Barkume K M, et al. ApJ, 2007, 655: 1172
[11] Gourgeot F, Carry B, Dumas C, et al. A&A, 2016, 593: A19
[12] Lacerda P. AJ, 2009, 137: 3404
[13] Brown M E, Bouchez A H, Rabinowitz D, et al. ApJ, 2005, 632: L45
[14] Ragozzine D, Brown M E. AJ, 2009, 137: 4766
[15] Rabinowitz D L, Barkume K, Brown M E, et al. ApJ, 2006, 639: 1238
[16] Stone R C. AJ, 1989, 97: 1227
[17] Da Costa G S. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. San Francisco: Steve B H, 1992, 23: 90
[18] Lin F R, Peng Q Y, Zheng Z J. MNRAS, 2020, 498: 258
[19] Berta S, Rubele S, Franceschini A, et al. A&A, 2008, 488: 533
[20] 胡钢, 向永源, 刘忠, 等. 天文研究与技术, 2021, 18: 213
[21] Gaia Collaboration (Vallenari A, Brown A G A, Prusti T, et al.) A&A, 2023, 674: A1
[22] Peng Q Y, Fan L Y. ChSBu, 2010, 55: 791
[23] Lin F R, Peng J H, Zheng Z J, et al. MNRAS, 2019, 490: 4382
[24] Green R M. Spherical Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 1985: 307-332
[25] Hastings D M, Ragozzine D, Fabrycky D C, et al. AJ, 2016, 152: 195
[26] 李丹, 郭碧峰, 陆星, 等. 天文研究与技术, 2023, 20: 234

Research on the Centering Algorithm of Dwarf Planet Haumea System

HAO Jia-nan[1,2] PENG Qing-yu[1,2] GUO Bi-feng[1,2] CAO Jiang-long[1,2] HONG Yao-yao[1,2]

(1 Department of Computer Science, Jinan University, Guangzhou 510632)

(2 Sino-French Joint Laboratory for Astrometry, Dynamics and Space Science, Jinan University, Guangzhou 510632)

Abstract Affected by the Earth's atmosphere, the image of primary and satellite system observed by ground-based telescopes often appears unresolved. Therefore, there may be some deviation between the system photocenter and the center of mass. The accurate measurement of the center of mass is helpful to improve the orbital parameters and to reveal the formation and evolution of the solar system. Taking the dwarf planet Haumea and its brighter satellite Hi'iaka as an example, we simulate its motion of the photocenter around the center of mass and explore whether the track of photocenter is the same with different seeings. The simulation results show that when using the two-dimensional Gaussian centering algorithm, the photocenter track is changing with the change of seeing, however, this phenomenon will not occur when using the modified moment centering algorithm. Based on the simulation results and the influence of noise, a new centering algorithm is proposed in this paper, which can effectively reduce the influence of changing seeing on the accurate photocenter position measurement. In addition, we also consider the influence of primary's changing luminosity on the photocenter position measurement. The images of dwarf planet Haumea were observed over 29 nights from February 7, 2022 to May 25, 2022 by three telescopes located in Yunnan Province. Our results show that the fitted error of the new centering algorithm's results is smaller than the two-dimensional Gaussian algorithm's results. In addition, we find that theoretical position of the bright satellite from Jet Propulsion Laboratory (JPL) and Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (IMCCE) ephemeris has a large deviation.

Key words astrometry, techniques: image processing, methods: data analysis, Kuiper belt objects: individual: Haumea